



A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești”  
SEBEȘ, 2016

## **STUDIUL STABILITĂȚII UNUI GRUP HIDRAULIC TURBINĂ-GENERATOR SINCRON AUTOEXCITAT LA UN M.H.C. AUTONOM**

Ion PIROI, Elisabeta SPUNEI, Florina PIROI

### **STABILITY STUDY FOR A TURBINE-SELF EXCITED SYNCHRONOUS GENERATOR HYDRAULIC GROUP OF A AUTONOMOUS M.H.C.**

This work aims to determine the stability of a self-excited synchronous generator, which works in the autonomous mode, based on the link between the hydraulic turbine–synchronous generator aggregate, the internal aggregate’s generator angle, which depends on its load, and the opening angle of the unit director. To verify the correctness of the relations presented in this work the designed aggregate has been tested with sudden loads and various resistive and inductive loads. The aggregate behaved as expected, remaining stable following the transitory processes.

Keywords: static and dynamic stability, self-excited synchronous generator, micro hydro power plant, self-adjustable drive

Cuvinte cheie: stabilitate statică și dinamică, generator sincron autoexcitat, microhidrocentrală, acționare autoreglabilă

### **1. Introducere**

În contextul producerii energiei electrice din surse regenerabile, utilizarea potențialului hidroenergetic devine o necesitate. Astfel, prin Directiva 2009/28/CE a Parlamentului European și a Consiliului [1] se impune ca la nivel comunitar ponderea de energie electrică produsă din surse regenerabile, până în anul 2020, să acopere 20 % din întreg

consumul total brut de energie. Tot în această Directivă, se impune ca, până în anul 2020, în România, ponderea energiei electrice produse din surse regenerabile de energie să acopere 24 % din consumul final brut de energie, iar până în 2030 ponderea să fie de 27 % [2]. În anul 2013 România a reușit ca ponderea energiei din surse regenerabile să acopere 23,9 % din consumul final brut de energie [3]. În anul 2014 Comunitatea Europeană a reușit ca ponderea de energie din surse regenerabile să fie de 15,3 % din consumul final brut de energie electrică [4]. Deși obiectivul României pentru anul 2020 poate fi considerat ca atins, pentru reducerea poluării la nivel național și global este încurajată utilizarea surselor regenerabile de energie.

În cazul utilizării microhidrocentralelor care lucrează în regim autonom, problema stringentă este asigurarea stabilității la variațiile de sarcină. Se poate considera că astfel de instalații se află, aproape în permanență, în regimuri tranzitorii în care sarcina variază de la zero la valoarea nominală, lent sau rapid.

Lucrarea are ca scop stabilirea capacității agregatului turbină hidraulică – generator sincron, ce echipează o microhidrocentrală, de a funcționa normal (stabil) la finele procesului tranzitoriu.

## **2. Stabilitatea statică al agregatului turbină hidraulică – generator sincron**

Stabilitatea statică este definită ca fiind capacitatea ansamblului de a funcționa stabil la variații mici de sarcină, care acționează lent asupra sistemului.

Ecuția mișcării agregatului turbină hidraulică – generator sincron este definită de relația [5]:

$$M_1 - M_2 = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = M_d \quad (1)$$

unde:  $M_1$  este cuplul produs de mașina de antrenare (turbina hidraulică);  $M_2$  este cuplul dezvoltat de generatorul sincron (cuplul rezistent);  $J$  este momentul de inerție al maselor aflate în mișcare de rotație;  $d\Omega/dt$  reprezintă variația în timp a turației;  $M_d$  este cuplul dinamic, care este nul la funcționarea stabilă.

La funcționarea stabilă al agregatului turbină hidraulică – generator sincron (cu turație constantă,  $\Omega = \text{ct.}$ ) ecuația mișcării devine:

$$M_1 - M_2 = 0 \quad (2)$$

adică punctul de funcționare se află la intersecția caracteristicilor mecanice ale turbinei și ale generatorului.

În figura 1 sunt prezentate două cazuri posibile, extreme, de variație a cuplurilor  $M_1$  și  $M_2$  în funcție de turație, adică presupuse caracteristici mecanice ale turbinei hidraulice și generatorului sincron la funcționarea stabilă și instabilă. Modificarea de sarcină este o perturbație care acționează asupra agregatului turbină hidraulică – generator sincron. Conform celor prezentate în figura 1.a), dacă valoarea sarcinii scade, atunci turația generatorului crește la valoarea  $n_1$ , cuplul dinamic devine negativ (cuplu de frânare) și va determina reducerea turației la valoarea inițială  $n_0$ . Dacă valoarea sarcinii crește (se conectează mai mulți consumatori care sunt alimentați cu tensiunea furnizată de generator), atunci turația generatorului scade, cuplul dinamic devine pozitiv și va determina creșterea turației până la valoarea inițială  $n_0$ , adică până la restabilirea echilibrului cuplurilor.

Pentru a avea o acționare stabilă sunt necesare două condiții [6]:

- Punctul A să fie real, adică să existe mașini de antrenare și mașini antrenate care să aibă caracteristicile asemănătoare cu cele din figura 1;

- Punctul A să fie un punct de funcționare stabil într-un domeniu admisibil de turații respectiv cupluri.

Matematic, condiția de stabilitate a unui punct de funcționare se exprimă prin relația:

$$\frac{dM_2}{d\Omega} > \frac{dM_1}{d\Omega} \quad (3)$$

adică pentru a avea un punct de funcționare stabil este necesar ca panta caracteristicii mecanice a mașinii de antrenare să fie mai mică decât panta caracteristicii mecanice a mașinii antrenate (rezistente) în punctul considerat. Putem numi o astfel de cuplare de mașină motoare și mașină rezistentă ca un sistem de **mașini cu acționare autoreglabilă**.

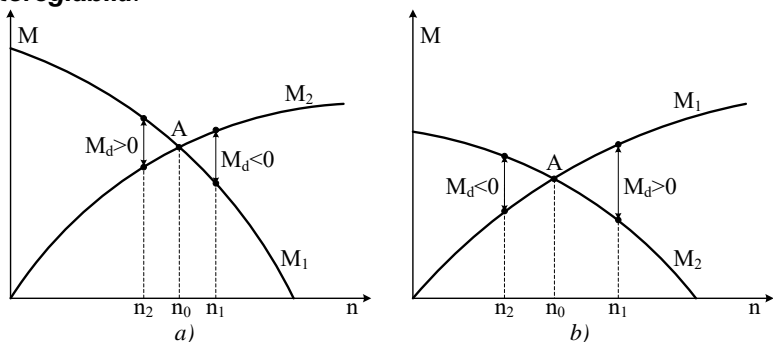


Fig. 1 Forma caracteristicilor turbinei hidraulice și a generatorului sincron: a) la funcționare stabilă; b) la funcționare instabilă

Pentru diagrama din figura 1b) în situația în care turația crește la valoarea  $n_1$ , cuplul dinamic devine pozitiv și va determina creșterea turației spre valori mari. În această situație, pentru a realiza funcționarea stabilă a agregatului este necesar să intervină regulatorul de turație care va forța aducerea turației la valoarea nominală prin reducerea debitului apei turbinate și va determina astfel funcționarea generatorului la turație constantă. Dacă perturbația acționează în scopul scăderii turației la valoarea  $n_2$ , cuplul dinamic devine negativ și va determina scăderea în continuare a turației. Pentru a realiza funcționarea stabilă a agregatului este necesar să intervină regulatorul de turație care va forța aducerea turației la valoarea nominală prin creșterea debitului apei turbinate. Deci punctul A din figura 1.b) este un punct de funcționare instabil.

Funcționarea agregatelor în puncte instabile necesită sisteme de reglare automată a turației (cuplului).

În figura 2 sunt prezentate caracteristicile mecanice pentru diferite tipuri de turbine hidraulice. Pentru diferite deschideri ale aparatului director ( $\alpha_4 > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ ) se constată că panta dreptei  $M_1 = f(n)$  este tot mai mare.

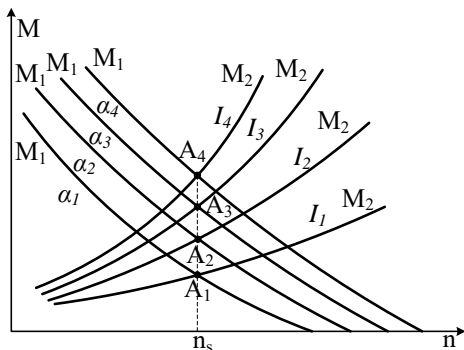


Fig. 2 Stabilitatea punctului de funcționare al agregatului turbină – generator sincron la turație sincronă

Turația pentru care cuplul turbinei este nul se numește **turație de ambalare**. Această turație poate fi atinsă în situația în care sarcina generatorului este nulă. Cunoașterea

acestei valori este importantă în vederea proiectării sistemului de reglare al debitului apei turbinate. Deci, în componența agregatului trebuie să existe regulatorul automat de viteză (RAV), care să modifice în permanență cuplul motor al turbinei în funcție de variația cuplului rezistent (cuplul electromagnetic al generatorului sincron și cuplul corespunzător pierderilor). Infinitatea de puncte de funcționare între  $A_1$  și  $A_4$  sunt puncte stabile pentru agregatul turbină-generator.

Din ecuația mișcării (1) rezultă că variația turației agregatului este cu atât mai mică cu cât momentul de inerție  $J$  este mai mare. Acesta poate fi mărit prin completarea grupului cu un volant.

### 3. Stabilitatea dinamică a ansamblului turbină hidraulică – generator sincron

Stabilitatea dinamică este definită ca fiind capacitatea ansamblului de a reveni la o funcționare stabilă când asupra lui acționează o perturbație de valoare mare și rapidă.

În cazul agregatului turbină hidraulică – generator sincron analizat stabilitatea dinamică este influențată de cele două elemente principale (turbină și generator), precum și de blocurile prezente în sistemul de reglare al turației și tensiunii. Constantele de timp ale fiecărui bloc din bucla de reglare au o contribuție esențială în stabilitatea dinamică a agregatului analizat.

O primă analiză a stabilității dinamice a întregului agregat se poate face și prin utilizarea instrumentelor virtuale [7].

Stabilitatea dinamică a ansamblului turbină hidraulică – generator sincron se determină pentru o anumită configurație completă și concretă a acestuia. În figura 3 este prezentată schema bloc a unei microhidrocentrale cu o putere instalată de 10 kVA echipată cu generator sincron autoexcitat.

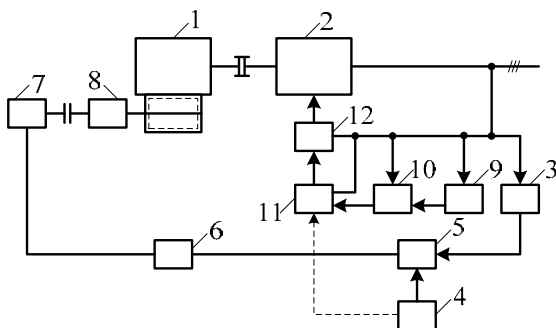


Fig. 3 Schema bloc a unei microhidrocentrale echipată cu generator sincron autoexcitat

În această figură s-au făcut următoarele notații: 1 – turbina hidraulică tip Banky cu aparatul

director, 2 – generatorul sincron autoexcitat, 3 – convertor frecvență-tensiune, 4 – element de prescriere al frecvenței, 5 – element de comparație, regulator și amplificator, 6 – bloc de comandă, 7 – motor electric de curent continuu cu două turații, 8 – sistem de transmisie, 9 – element de prescriere al tensiunii, 10 – element de comparație, 11 – dispozitiv de comandă pe grilă, 12 – redresor comandat pentru alimentarea excitației generatorului sincron.

Considerând căderea de apă  $H$  constantă, puterea mecanică  $P_1$ , în kW, furnizată de turbina hidraulică este definită de relația [8]:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T = K_1 \cdot Q \quad (4)$$

unde  $H$  este căderea de apă, în metri,  $Q$  este debitul de apă prin turbină, în  $m^3/s$ ,  $\eta_T$  este randamentul turbinei, iar  $K_1$  este o constantă a turbinei definită de relația:

$$K_1 = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (5)$$

În relația (5)  $\rho$  este densitatea apei, iar  $g$  este accelerația gravitațională.

Debitul de apă  $Q$  turbinat depinde de deschiderea  $\alpha$  a aparatului director, iar la o turbină Banki, acesta se poate determina cu relația:

$$Q = K_2 \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (6)$$

unde  $K_2$  este o constantă ce depinde de deschiderea aparatului director.

Puterea furnizată de turbină este:

$$P_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot (1 - \cos \alpha) = K \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

iar puterea electrică furnizată de generator, în ipoteza neglijării valorii rezistențelor generatorului sincron autoexcitat, cu poli aparenti este:

$$P_2 = m \cdot U \cdot \left[ \frac{U_{\theta E}}{X_d} \cdot \sin \theta + \frac{U \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\theta \right] \quad (8)$$

sau

$$P_2 = \sin \theta \cdot (K_3 + K_4 \cdot \cos \theta) \quad (9)$$

În relația (8)  $K_3$  și  $K_4$  sunt constante dependente de parametri generatorului sincron, considerați constanți, iar  $\theta$  este unghiul intern. Acești parametri pot fi identificați prin măsurători sau prin utilizarea unui sistem de achiziție și monitorizare [9-12].

În funcție de puterea furnizată de turbină și puterea furnizată de generatorul sincron se rescrie ecuația mișcării:

$$K \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin \theta \cdot (K_3 + K_4 \cdot \cos \theta) = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (10)$$

Prin relația (10) se stabilește legătura între deschiderea  $\alpha$  a aparatului director, unghiul intern  $\theta$  al generatorului și viteza unghiulară  $\Omega$  a agregatului turbină hidraulică – generator sincron.

Pentru o anumită turație prestabilită ( $\Omega = \text{ct.}$ ) se poate stabili o relație între unghiul de deschidere  $\alpha$  al aparatului director și unghiul intern  $\theta$  al generatorului sincron (dependent de mărimea sarcinii acestuia după curbele cunoscute):

$$\alpha = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\sin \theta \cdot (K_3 + K_4 \cdot \cos \theta)}{2K}} \quad (11)$$

Literatura tehnică de specialitate indică valori pentru unghiul intern  $\theta$  cuprinse între  $(0 \div 40)^\circ$ , pentru a fi asigurată stabilitatea generatorului sincron [5].

Astfel, se observă că procesele tranzitorii care determină variațiile de turație sunt influențate de variațiile cuplului turbinei și de încărcarea generatorului. Aceste procese tranzitorii [12-14] pot fi monitorizate și controlate prin sisteme moderne capabile să readucă la stabilitate întreg agregatul turbină hidroelectrică – generator sincron.

Gradul de neregularitate  $\delta$  al ansamblului turbină hidroelectrică – generator sincron poate fi exprimat prin relația:

$$\delta = \frac{\Omega_{max} - \Omega_{min}}{\Omega_{med}} = \frac{K \cdot M_d}{J \cdot \Omega_s^2} \quad (12)$$

unde  $\Omega_{max}$ ,  $\Omega_{med}$ ,  $\Omega_{min}$  sunt vitezele unghiulare maximă, medie, minimă,  $\Omega_s$  este viteza unghiulară sincronă, iar  $M_d$  este cuplul dinamic. Relația reconfirmă necesitatea unui volant la MHC autonome.

Microhidrocentrala analizată a fost executată și testată, rezultatele experimentale la încărcarea bruscă cu sarcină inductivă [16] au fost în concordanță cu cele prezentate, fiind asigurată stabilitatea agregatului turbină hidroelectrică – generator sincron.

#### 4. Concluzii

- Stabilitatea unui sistem este un indicator de calitate.
- La agregatul turbină hidroelectrică – generator sincron proiectat, realizat și testat acest indicator a corespuns, acesta rămânând stabil în urma proceselor tranzitorii.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] \* \* \* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=celex:32009L0028>.
- [2] \* \* \* <http://greenviro.ro/romania-si-ar-putea-atinge-tinta-de-27-a-ponderii-energiei-regenerabile-in-consum-inca-din-2020-2/>.
- [3] \* \* \* [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-5180\\_ro.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-5180_ro.htm).
- [4] \* \* \* <http://www.green-report.ro/ponderea-surselor-regenerabile-reprezinta-153-din-consumul-final-brut-de-energie-din-ue/>.
- [5] Piroi, I., *Mașini electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2004.
- [6] Dolga, V., *Teoria Sistemelor Automate*, [http://www.mec.upt.ro/dolga/Cap\\_9.pdf](http://www.mec.upt.ro/dolga/Cap_9.pdf).
- [7] Subțirelu, Gh., Dobriceanu, M., et.al., *Virtual Instrument for Study Dynamic Regimes of Variable Reluctance Synchronous Motors*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, 2014.
- [8] Piroi, I., et. al, *Conversia Energiei Electrice a Apei, Pământului și a Deșeurilor Organice*, Editura Eftimie Murgu, Reșița, 2010.

- [9] Deaconu, A.S., Gh., Deaconu, D., et.al., *GUI Interfaces for Off-Line Determination of DC Electric Motor Parameters*, International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, București, 2011.
- [10] Dachea, C., Găiceanu, M., et.al., *Second Order Load Torque Estimator of the Vector-Controlled Synchronous Drive*, 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, Galați, 2013.
- [11] Chioncel, C.P., Erdodi, G.M., et.al., *Control of Wind Power Systems Imposing the Current in the Intermediate Circuit of the Converter at Variable Wind Speed*, 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, București, 2015.
- [12] Augustinov, L., Spunei, E., et.al., *The control system of voltage and speed for an induction generator running in an autonomous service*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Electromechanical and Power Systems, Chișinău, 2013.
- [13] Manolea, Gh., Ivanov, S., et.al., *Control of the Electric Drive of the Anti-Hail Launching System*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, 2014.
- [14] Câmpeanu, A., Enache, M.A., et.al., *Transitory Processes Determined by the Shunt-Reactors in the High Voltage Networks. Theoretical Synthesis and Simulation*, International Conference And Exposition On Electrical And Power Engineering, Iași, 2014.
- [15] Birou, I., Maier, V., et.al., *Indirect Vector Control of an Induction Motor with Fuzzy-Logic based Speed Controller*, International Journal Advances in Electrical and Computer Engineering, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 116-120, Suceava, 2010.
- [16] Spunei, E., Piroi, I., et.al., *A Study on the Voltage Control Loop of a Self-excited Synchronous Generator in a Micro-Hydroelectric Power Plant*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Electromechanical and Power Systems, Chișinău, 2015.

Prof. Univ. Dr. Ing. Ec. Ion PIROI  
 Facultatea de Inginerie și Management, Universitatea „Eftimie Murgu”  
 din Reșița, membru AGIR,  
 email i.piroi@uem.ro

Șef lucr. Dr. Ing. Elisabeta SPUNEI  
 Facultatea de Inginerie și Management, Universitatea „Eftimie Murgu”  
 din Reșița, membru AGIR,  
 email e.spunei@uem.ro

Dr. Tech. Florina PIROI  
 Institute of Software Technology and Interactive Systems,  
 Vienna University of Technology, Austria,  
 email piroi@ifs.tuwien.ac.at